

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ФАПЧ

Дядюра М.О., Мухетдинова А.Р., Астрецов Д.В.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
проспект Мира, 19, Екатеринбург, Свердловская обл., 620002, Россия
тел.: 89126310117, e-mail: aliya_muhetdinova@mail.ru, corroccor@mail.ru

Аннотация — Приведены результаты исследований системы фазовой автоподстройки частоты с учетом и без учета аддитивных помех, сопровождающих эталонный сигнал. Использование метода теории выбросов проведен теоретический анализ зависимости вероятности срыва слежения (синхронизации) за заданное время наблюдения от отношения мощностей сигнала и помехи в канале эталонного сигнала. Для получения более точных результатов разработана имитационная модель системы в пакете динамических систем «Simulink» в среде Matlab, с использованием которой получены основные характеристики системы.

DIGITAL SIMULATION OF THE PLL

Dyadyura M.O., Muhetdinova A.R., Astrecov D.V.

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
pr. Mira, 19, Yekaterinburg, Sverdlovsk region, 620002, Russian Federation
ph.: 89126310117, e-mail: aliya_muhetdinova@mail.ru, corroccor@mail.ru

Abstract — The results of studies of phase-locked loop system with and without additive noise, accompanying a reference signal, are given. Theoretically based, the dependence of the probability of failure tracking (synchronization) over a defined time of supervision from the power of the signal and noise in the channel of the reference signal analyzed by using the emission theory. For more accurate results the imitation model of system developed «Simulink» the dynamical systems package in Matlab, using which the basic characteristics of the system are got.

I. Введение

Фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ) является многофункциональной системой, использующейся для частотной синхронизации, уплотнения и разделения каналов в системах связи, умножения и преобразования частоты, а также в других целях. ФАПЧ — это система автоматического регулирования, которая подстраивает фазу управляемого генератора в соответствии со значением фазы опорного сигнала [1].

Многие общеизвестные фирмы применяют систему ФАПЧ в своих микросистемных компонентах. Так, к примеру, фирма Analog Devices использует систему ФАПЧ для некоторых типов своих синтезаторов и ЦАП, а также в различном качестве для некоторых типов приемопередатчиков. Аналогично используют данную систему и другие фирмы: Texas Instruments, Motorola, Gran-Jansen AS [3].

Для анализа работы системы желательно найти точное решение ее уравнения, но при изучении системы более высоких порядков, чем первый, данная задача крайне затруднительна. Таким образом, актуальность приобретают практические исследования, такие как моделирование.

Цифровое моделирование системы ФАПЧ осуществляется в пакете прикладных программ Matlab.

В графической среде имитационного моделирования Simulink построена модель исследуемой системы фазовой автоподстройки частоты с разными типами фильтров, а именно: система фазовой автоподстройки частоты с инерционным звеном, с пропорционально-интегрирующим фильтром, с астатизмом второго порядка.

II. Принцип функционирования системы и режимы работы.

Рассмотрим упрощенную одно-петлевую, изолированную от внешних воздействий систему ФАПЧ [1]. По своей структуре такая ФАПЧ — это следящая система автоматического регулирования с

одним входом, одним выходом и однопетлевой обратной связью (Рис.1).

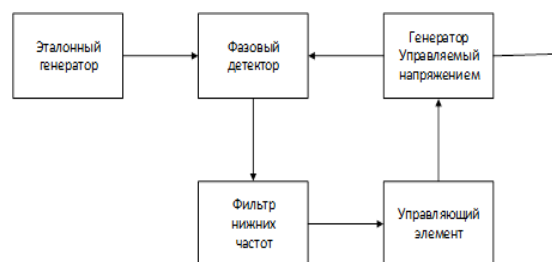


Рис.1. Функциональная схема ФАПЧ

Данная система используется для стабилизации частоты автогенератора по сигналу более стабильного эталонного генератора (ЭГ). Объект регулирования — генератор управляемый напряжением (ГУН), причем сигнал управления воздействует на частоту и фазу его автоколебаний. На входе системы действует сигнал эталонного генератора в виде периодической или квазипериодической функции (управляющее воздействие), а с ее выхода снимается сигнал ГУН. Детектор рассогласования в системе — фазовый детектор, функцией которого является фиксирование ошибки между фазой сигналов с эталонного и подстраиваемого генераторов. Фильтр нижних частот предназначен для коррекции передаточной функции замкнутой системы и фильтрации возможных помех, управляющий элемент для изменения частоты (фазы) подстраиваемого генератора.

Существует несколько режимов работы системы [1]. **Стационарный режим.** Частоты ЭГ и ГУН равны, в результате разность фаз между сигналами генераторов постоянна, как и выходное напряжение фазового детектора.

Режим удержания. Частоты ЭГ и ГУН равны, и незначительные изменения параметров ГУН, определяющих его частоту, в среднем полностью компенсируются действием ФАПЧ. Полоса

удержания — область начальных расстроек, в которой возможен этот режим. Ширина полосы удержания равна разности частот ГУН, соответствующих наибольшему и наименьшему напряжениям на выходе фазового детектора.

Режим биений. При данном режиме разность фаз подстраиваемого и эталонного генераторов увеличивается с течением времени. Режим биений наблюдается в тех случаях, когда начальная расстройка ГУН относительно ЭГ (т.е. расстройка, соответствующая нулю напряжений на выходе ФД) больше полосы захвата.

Режим захвата — переходное состояние системы, при котором режим биений переходит с течением времени в режим удержания [1]. Под полосой захвата понимают область начальных расстроек, в которой при любых начальных условиях устанавливается режим удержания. Обычно в момент включения частоты ГУН и ЭГ не совпадают, и в системе наблюдается режим биений. При этом сигнал ГУН модулируется по частоте напряжений биений.

III. Измерение частотных полос захвата и удержания и построение детекторной характеристики.

Для определения полос захвата и удержания построена имитационная модель системы ФАПЧ в среде Matlab в графической среде имитационного моделирования (Рис.2) [4]. В состав модели входят: генератор гармонических колебаний с постоянной частотой (Sine Wave), генератор с линейно-изменяющейся частотой (Chirp Signal), генератор белого шума, фазовый детектор, состоящий из перемножителя и ФНЧ, полосовой фильтр, три вида фильтров обратной связи, усилитель и генератор, управляемый напряжением (ГУН). Общее время моделирования равно 10 с.

В результате анализа подобраны параметры имитационной модели: частота ЭГ равна 1000 Гц, амплитуда равна 1 В, сигнал синусоидальной формы; начальная частота генератора с линейно-изменяющейся частотой (Initial frequency) равна 900 Гц, конечная частота (Frequency attargettime) равна 1100 Гц, время изменения частоты (Frequency attargettime) равно 10 сек. При таких настройках генератор линейно-изменяющейся частоты изменяет свою частоту на 20 Гц каждую секунду, на пятой секунде данный генератор имеет номинальную частоту, равную 1000 Гц. Частота покоя ГУН равна 1000 Гц, крутизна (Input sensitivity) — 5 Гц/В, начальная фаза равна нулю. Коэффициент передачи в петле обратной связи равен 10 1/с.

Полосовой фильтр имеет четвертый порядок, нижняя частота 900 Гц, верхняя 1100 Гц. ФНЧ, входящий в состав фазового детектора, также имеет четвертый порядок и полосу пропускания 200 Гц.

В процессе исследования нами рассматривались следующие варианты построения системы:

- ФАПЧ без фильтра
- ФАПЧ с инерционным звеном, постоянная времени $T_1 = 0.1$ секунды
- ФАПЧ с пропорционально интегрирующим фильтром, постоянная времени $T_2 = 0.1$ секунды, $T_3 = 0.03$ секунды

- ФАПЧ с астатизмом второго порядка, постоянная времени $T_4 = 0.2$ секунды.

С помощью имитационной модели системы ФАПЧ проведено измерение полос захвата и удержания при различных вариантах системы:

- Система без фильтра: Полоса захвата: 25 Гц, полоса удержания: 25 Гц
- Система с инерционным звеном, постоянная времени $T_1 = 0.1$ секунды Полоса захвата: 10 Гц, полоса удержания: 25 Гц
- ФАПЧ с пропорционально-интегрирующим фильтром, постоянная времени $T_2 = 0.1$ секунды, $T_3 = 0.03$ секунды: Полоса захвата: 6 Гц, полоса удержания: 25 Гц
- ФАПЧ с астатизмом второго порядка, постоянная времени $T_4 = 0.2$ секунды: Полоса захвата: 25 Гц, полоса удержания: 25 Гц
- Исследование характеристики фазового детектора.

Для построения характеристики фазового детектора имитационная модель системы ФАПЧ реализована без обратной связи. Характеристика необходима для определения порога и математического ожидания фазового сдвига. В соответствии

с характеристикой фазового детектора порогом является значение сигнала на выходе фазового детектора при разности фаз ЭГ и ГУН $\varphi = 90^\circ$

$$F(90) = 0,55 \quad (1)$$

Анализ срыва слежения методом теории выбросов. Система ФАПЧ при воздействии шумов подвержена срыву слежения. Существует несколько методов анализа срыва слежения. В настоящем исследовании рассмотрен метод теории выбросов. В данном методе под срывом слежения подразумевается выход фазы сигнала ГУН за пределы аперттуры фазового детектора [2].

В результате преобразований получено следующее выражение для оценки вероятности срыва слежения:

$$\begin{aligned} P_{\text{ср}} &\approx f_{\text{ш}} T \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) = \\ &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{T\Phi}} T \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\frac{1}{q^2\Delta f_{\text{Э}}}}\right) = \\ &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{T\Phi}} T \exp\left(-\frac{(x-m)^2 2q^2\Delta f_{\text{Э}}}{K * \Delta f_{\text{Э}}}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

где $q^2 = \frac{U_0^2}{2\Delta f_{\text{шф}} N_0}$ — отношение средних мощностей

сигнала и шума на входе фазового детектора, U_0^2 — амплитуда ЭГ, $\Delta f_{\text{шф}}$ — полоса пропускания полосового фильтра, K — коэффициент передачи системы, $T_{\text{ф}}$ — постоянная времени фильтра в петле обратной связи, T — время функционирования системы, x — пороговое значение, m — математическое ожидание фазового сдвига ГУН'а, $\Delta f_{\text{Э}}$ — эквивалентная шумовая полоса фильтра на выходе генератора белого шума, $\Delta f_{\text{Э}}$ — эквивалентная шумовая полоса замкнутой системы.

На основании полученного выражения построены теоретические зависимости вероятности срыва слежения системой с инерционным звеном от отношения средних мощностей сигнала и шума при различных расстройках частот, а именно:

$$f_{\text{ЭГ}} = 1000 \text{ Гц}, f_{\text{ГУН}} = 1002 \text{ Гц, т.е. } \text{fr} = 2 \text{ Гц};$$

$f_{ЭГ} = 1000$ Гц, $f_{ГУН} = 1005$ Гц, т.е. $f_p = 5$ Гц;
 $f_{ЭГ} = 1000$ Гц, $f_{ГУН} = 1007$ Гц, т.е. $f_p = 7$ Гц;
 $f_{ЭГ} = 1000$ Гц, $f_{ГУН} = 1009$ Гц, т.е. $f_p = 9$ Гц.

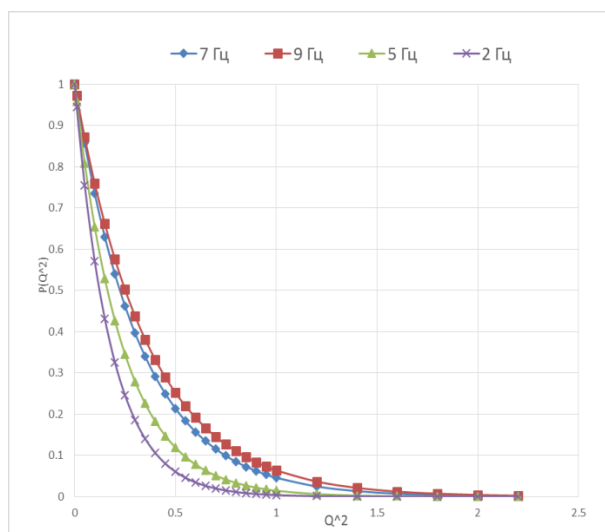


Рис.2. Теоретическая зависимость вероятности срыва слежения от отношения мощностей сигнала и шума для системы ФАПЧ с инерционным звеном.

Для сравнения и анализа теоретических данных с экспериментальными проведены опыты по исследованию срыва слежения системой ФАПЧ с инерционным звеном для аналогичных расстроек.

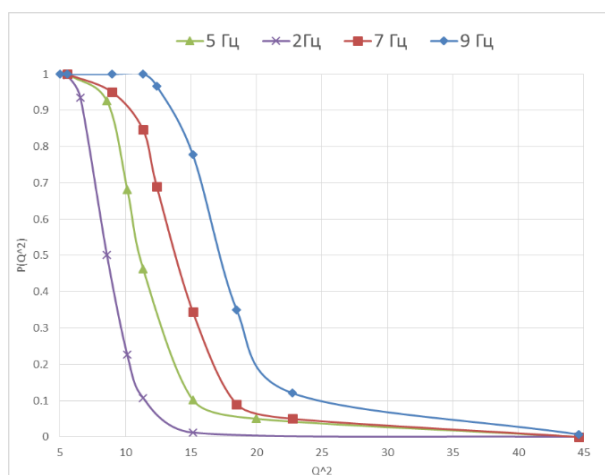


Рис.3. Экспериментальная зависимость вероятности срыва слежения от отношения мощностей сигнала и шума для системы ФАПЧ с инерционным звеном.

Сложность экспериментальных исследований состояла в значительном количестве опытов. Для всех вышеперечисленных расстроек в целях корректного построения зависимости взято 8-10 значений отношения средних мощностей сигнала и шума, каждое из которых получено на основании не менее 1000 опытов. При данном количестве опытов ручной запуск программы не является эффективным и ресурсоемким, вследствие чего в среде Matlab написан код, реализующий взаимодействие Matlab и Simulink и позволяющий автоматизировать выполнение экспериментов при определенных параметрах.

Анализируя полученные теоретические и экспериментальные зависимости вероятности срыва слежения от отношения средних мощностей сигнала и шума, отметим значительное расхождение

теоретических и практических данных, вызванное неточностью метода теории выбросов для малых отношений сигнала и шума.

Очевидно, что при увеличении расстройки для одинаковых отношений сигнала и шума вероятность срыва слежения системой повышается. Но при этом отметим сужение диапазона отношения сигнала и шума.

Теоретический анализ срыва слежения методом выбросов невозможен для систем ФАПЧ без фильтра, с пропорционально-интегрирующим фильтром, с астатизмом второго порядка. В связи с этим особую важность приобретают экспериментальные исследования.

IV. Заключение

В данной работе исследованы принципы работы фазовой автоподстройки в разработанном программном обеспечении в среде Matlab. Определены полосы захвата и удержания при различных вариантах системы. Методом теории выбросов проведен анализ срыва слежения в системе с инерционным звеном. По результатам расчета построена зависимость теоретической вероятности срыва слежения от средних мощностей сигнала и шума. На основе опытов построена экспериментальная зависимость вероятности срыва слежения от средних мощностей сигнала и шума. Полученные теоретическая и экспериментальная зависимости расходятся в результате неточности метода выбросов при малых отношениях средних мощностей сигнала и шума

IV. Литература

- [1] Shahgildyan V.V., Lyahovkin A.A. Systema fazvoy avtopodstroyki chastoty. M.: SvyazPubl, 1972. 447 p.
- [2] Obrezkov G.V., Razevig V.D. Metodyanalizasryvaslezheniya. M.: Sovetskoeradio Publ., 1972. 240 p.
- [3] Golub V. Sistema FAPCH I ee primeneniye. Internet portal Rynok microelektroniki. Available at: http://www.chipnews.ru/html/cgi/arhiv/00_04/stat_2.htm (accessed 1.12.2015)
- [4] Chernyh I.V. Modelirovanie electrotehnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. M.: DMK Press. Saint Petersburg: Piter Publ., 2008. 288 p.